



*II CAIM 2010  
Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010*

## **LA CIENCIA DE LAS MEDICIONES EN LAS APLICACIONES DE LA INGENIERÍA MECÁNICA**

Juan Ángel Forastieri, Diego Villalba

*Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Buenos Aires – Medrano 951 – Cdad. Autónoma de Bs. As. - Argentina*  
[jaforast@inti.gob.ar](mailto:jaforast@inti.gob.ar) [dfv1950@fibertel.com.ar](mailto:dfv1950@fibertel.com.ar)

### **RESUMEN**

La enseñanza de las ciencias de las mediciones dentro del campo académico ha tenido sus orígenes en la industria metalmeccánica donde las mediciones lineales y fundamentalmente de la mano de la industria automotriz se requerían mediciones con elevados niveles de exactitud para garantizar las estrechas tolerancias de fabricación de piezas. Por ese motivo y hasta nuestros días, sigue siendo prácticamente la única magnitud considerada en los planes de estudio en la carrera de ingeniería mecánica.

En este artículo se trata de analizar la necesidad de introducir los conceptos de otras magnitudes mecánicas en el ámbito académico del futuro ingeniero mecánico y su incumbencia con los procesos de medición, los sistemas de la calidad abordados por las normas ISO 9000 e ISO 17025, la vinculación internacional de las capacidades de medición declaradas en el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y los problemas para vencer las barreras comerciales y legales a que están expuestos los países.

**Palabras Claves:** bienes públicos, impacto económico, trazabilidad, mediciones, formación profesional

## 1. INTRODUCCIÓN

Todos estamos familiarizados con las pesas y las medidas pero no siempre reparamos en que su aplicación correcta es esencial para protegernos como consumidores y para mantener una competencia justa entre empresas. Cuando no existe una idea clara, a nivel de gobierno, educativo y de sector productivo, sobre el papel que juega la metrología, las entidades correspondientes se ven continuamente cuestionadas y sometidas a revisión de su finalidad, de sus objetivos y de sus programas de trabajo. A la larga, el resultado es que no resultan bien servidos ni el gobierno, ni la industria, ni el comercio, ni la población, que son quienes pagan directa o indirectamente y deberían beneficiarse de las acciones. [1]

Las primeras preguntas a plantear son: ¿Cuán necesaria es la metrología?, ¿Para quiénes?, Por qué?, ¿Cuáles magnitudes entran en juego? ¿Cómo se relaciona con la formación de los Ingenieros Mecánicos? Trataremos de dar algunas respuestas.

Todo lo relacionado con los instrumentos de medición y el uso de patrones nacionales e internacionales, requiere de una base metroológica y legal. La formación de ingenieros y en particular de los Ingenieros Mecánicos debe dar respuestas adecuadas para garantizar la corrección de las mediciones en aras del interés público

En términos generales, se pretende que cuando puedan presentarse conflictos de interés o cuando resultados incorrectos de mediciones puedan afectar adversamente a individuos o a la sociedad, todas las personas puedan confiar en la corrección de los resultados de medición.

Una metrología bien aplicada promueve beneficios económicos y sociales. Por ejemplo, permite evitar pagos injustificados por parte de los consumidores por los miles de toneladas anuales de productos que no reciben cuando las básculas no cumplen los requisitos legales o los productos preenvasados no llevan la cantidad correcta, cuando las bombas expendedoras de combustibles están fuera de las tolerancias permitidas, los contadores de consumo de energía no marcan correctamente, cuando los taxímetros no funcionan adecuadamente, cuando los relojes no registran correctamente el tiempo en los estacionamientos públicos, etc. Ayuda a evitar prácticas y competencia desleales fortaleciendo el principio de competitividad y fomentando la ética en todo tipo de transacciones, evita tensiones sociales al ayudar a que toda persona obtenga protección efectiva de sus intereses y derechos en las relaciones de los particulares entre sí y de éstos con el Gobierno en la procuración de la justicia, insta al empresario a cumplir con disposiciones de fabricación o de servicios, etc. [2]

El ciudadano como cliente en el comercio al por menor, es posiblemente el enfoque más comúnmente asociado con la metrología legal. Y de hecho el impacto, por ejemplo, de unos pocos gramos por persona en cada transacción comercial se convierte en muchos kilogramos al sumar dichas transacciones. Otros factores importantes para la economía doméstica son el llenado del depósito de vehículos con combustible o la compra de gas licuado doméstico y el pago por servicios públicos tales como agua y electricidad.

Asimismo, la metrología legal busca proteger a los individuos de la sociedad en aspectos que no son estrictamente comerciales al verificar, por ejemplo, instrumentos de medición empleados en diagnóstico y tratamientos médicos así como los instrumentos empleados en mediciones relacionadas con la calidad del agua, el aire y en general del medio ambiente. Pero hay otros casos menos obvios en que una medición correcta tiene impacto sobre la salud. Por ejemplo, la determinación correcta de niveles de sordera con miras a la aprobación de retiro de empleados o el control y reglamentación del ruido ya que se conoce que éste produce efectos nocivos a largo plazo.

Para contribuir a la seguridad ciudadana, la metrología actúa sobre varios sectores. Uno de ellos es el relacionado con el tránsito. Todo lo relacionado con el ajuste correcto de un vehículo (presión de los neumáticos, funcionamiento del motor, sistema de dirección, sistema de frenos, velocidad, sistema eléctrico, señales de emergencia) requiere de algún tipo de instrumento de medición. Las luces de tránsito (semáforos o luces rojas) demandan una sincronización adecuada. Los instrumentos de medición empleados por la policía tales como alcoholímetros para las pruebas del grado de alcohol en la sangre o los medidores de velocidad para control en carreteras y calles, requieren también de una verificación periódica. También la seguridad en el ambiente de trabajo requiere de mediciones que son directa o indirectamente verificadas. Para aprobar el uso y darles mantenimiento a los equipos de seguridad personal o colectiva tales como protectores, barreras, ropa especial, detectores de humo, extintores de incendio, salidas de emergencia, etc., éstos deben ceñirse a determinadas normas cuya verificación de cumplimiento demanda mediciones de todo tipo.

En lo referente al medio ambiente todo habitante está expuesto en mayor o menor grado a contaminantes que no sólo son molestos, sino también nocivos para la salud, todos ellos sujetos a medición.

La metrología apoya a la industria nacional al proporcionarle una base técnica, de precisión adecuada a sus necesidades reales, para que esté en capacidad de calibrar, comprobar y verificar sus instrumentos de medición y de control, y de asegurar la calibración de los instrumentos y equipos de medición de los laboratorios de pruebas y ensayos industriales.

En el campo industrial la metrología actúa, por ejemplo sobre instrumentos tales como calibradores, micrómetros, relojes comparadores, galgas o bloques rectangulares, manómetros, termómetros industriales, pares termoeléctricos, pirómetros, balanzas analíticas, etc. como también máquinas de ensayo.

La industria en general necesita determinaciones relacionadas con fuerza, presión, vacío, flujo, longitudes, áreas y volúmenes, ángulos, engranajes y cilindros, rugosidad, temperaturas, viscosidad, densidad, corriente continua y alterna, altas frecuencias, tiempo, materiales de referencia para medios magnéticos de almacenamiento de datos, radiaciones ionizantes, etc.

Tomando en cuenta la diversidad de aplicaciones metrológicas señaladas anteriormente que involucran otras magnitudes más allá de las dimensionales, parece necesaria una revisión en los planes de estudios de las ingenierías otorgando los espacios necesarios para una adecuada formación. En el caso de los Ingenieros Mecánicos que tradicionalmente han sido formados en metrología dimensional es evidente la necesidad de ampliar el campo a otras magnitudes, dado el abanico de aplicaciones de este profesional y máxime teniendo en cuenta su cada vez mayor inserción en cuestiones vinculadas no solo con la producción de bienes y servicios sino con aspectos que hacen a los bienes públicos como la seguridad, la salud y el medio ambiente. [3]

Cabe entonces indicar la caracterización de las magnitudes sobre las cuales el Ingeniero Mecánico debería formarse en el campo de la Ingeniería de las Mediciones

## **2. MAGNITUDES FUNDAMENTALES EN LA INGENIERIA MECANICA**

A partir de las consideraciones enunciadas arriba podemos describir el concepto metrológico de la definición y materialización de cada una de las magnitudes abordadas y su relación con la vida cotidiana y la participación del ingeniero.

## 2.1. Dimensional

Se refiere a la aplicación del metro como unidad básica del sistema internacional de unidades, sus submúltiplos y derivados a los efectos de mensurar longitudes, ángulos, formas geométricas y textura superficial de todas las piezas y componentes mecánicos de productos y elementos de máquinas y equipos obtenidos a través de procesos industriales.

Los objetivos de este campo de la metrología son asegurar la funcionalidad de los sistemas mecánicos conforme a los requisitos de proyecto y diseño de los mismos y la intercambiabilidad de componentes y subconjuntos mecánicos producidos. De este modo es posible el montaje indistinto de partes para el obtener el sistema final, aunque estos sean fabricados en plantas productivas localizadas en distintos lugares, aún en distintos países y con distintas tecnologías, cuestiones que resultan más relevantes en una economía globalizada.

Su relación íntima con las tecnologías de fabricación conduce a una formación ingenieril del Ingeniero Mecánico consustanciado con los conceptos, el valor y la problemática del universo de la precisión mecánica, ya que es en este campo donde la tecnología mecánica apoyada por otras tecnologías ha producido los avances más espectaculares. En este campo el Ingeniero Mecánico debe comprender, ser capaz de concebir y aplicar los sistemas de medición, instrumentales, equipos y demás componentes que permitan sostener el sistema metrológico de referencia de la instalación industrial moderna. No solo es necesario el conocimiento sobre tipos y usos del instrumental de aplicación universal, sino fundamentalmente que el profesional cuente con los criterios necesarios para resolver la solución integral de los diversos problemas metrológicos que se presentan en el diseño y la construcción mecánicos.

Un aspecto relacionado se refiere a las bases económicamente eficientes que sin duda constituyen una de las preocupaciones de los ingenieros fabriles, ya que la metrología dimensional contribuye al logro de la mejora continua de la calidad entendiendo por tal la disminución progresiva de los costos industriales. Hoy, evidentemente, este concepto está ampliado debido a la complejidad de los mercados, productos y de la innovación tecnológica, que lleva a que las empresas tengan que enfocar una estrategia más allá de la eficiencia. Solo a través de modelos de Calidad Total es posible abordar estos nuevos problemas. Esto involucra nuevos conocimientos y nuevas actitudes de los Ingenieros Mecánicos, que ahora deben comprender problemas y participar en tareas multidisciplinarios.

En la Fig. 1 se presenta la cadena de trazabilidad de esta magnitud [4]

Un metro se define como la distancia que recorre la luz en vacío, en un intervalo de tiempo de  $1/299792458$  s. Por lo tanto, por definición, la velocidad de la luz en vacío es de  $299792458$  m/s

$$C_0[m/s] = \lambda_0[m] \cdot f[s^{-1}] \quad (1)$$

f: frecuencia,

$\lambda_0$  : longitud de onda en el vacío,

$C_0$ : velocidad de la luz en vacío



Figura 1: Cadena de trazabilidad en longitud

## 2.2. Masa

Esta magnitud no es abordada en ninguna de las etapas de la carrera del Ingeniero Mecánico. Es una de las magnitudes de base del Sistema Internacional y es la única de ellas que a la fecha está materializada a través de un prototipo. El prototipo de referencia es el que se encuentra en la Oficina de Pesas y medidas de Paris.

Todos los ciudadanos interactúan con esta unidad diariamente, fundamentalmente en las actividades comerciales normales (supermercado, comercios en general, compra y venta de oro, garrafas de gas licuado, medicina, transporte aéreo, etc.).

La industria, efectúa determinación de masa de productos que forman parte de los procesos de fabricación y producción.

Además estas actividades industriales como las netamente comerciales requieren pesar con instrumentos legalmente aprobados por la autoridad competente en ese ámbito, que en el caso de nuestro país es la Secretaria de Coordinación Técnica del Ministerio de Economía y Producción conjuntamente con el INTI. Esto en definitiva como destinatario primero al ciudadano libre e informado, vinculado con otros ciudadanos, protegidos y estimulados por el Estado (5).

El Estado por su parte requiere que los exportadores pesen correctamente porque de ello dependen los ingresos fiscales por retenciones a las exportaciones por ejemplo en los embarques de ultramar de granos. Solamente pensar que la exportación de productos agrícolas es la mayor fuente de ingreso de divisas, se puede rápidamente imaginar la cantidad de puntos de pesajes que existe a lo largo de todo el país donde el Estado debe estar presente. Si hablamos de plataformas de pesar y tolvas de embarques solamente, estamos en un número cercano a los 2 000 puntos. Con una exportación de 70 millones de toneladas imaginar un error de medición en la balanza de un 0,5% equivaldría a cifras significativas de varios millones de dólares en diferencias de ingreso al fisco.

En ámbitos de la salud, los pesos son diferentes, pero la implicancia directa con el ciudadano común es mucho más contundente, debido a que una mala dosis de un producto en un medicamento puede poner en peligro la vida.

Esta situación implica que los instrumentos de pesar requieran niveles de exactitud importantes. Antes de su comercialización, es necesario cumplir con la ley 19511 de Metrología que dice que todo instrumento de medición reglamentado debe disponer de una aprobación de modelo y de una verificación primitiva otorgada por la autoridad competente.

En la figura 2 de abajo se da una idea de cómo se genera la cadena de trazabilidad en esta magnitud a partir del kilogramo patrón hasta llegar al consumidor.

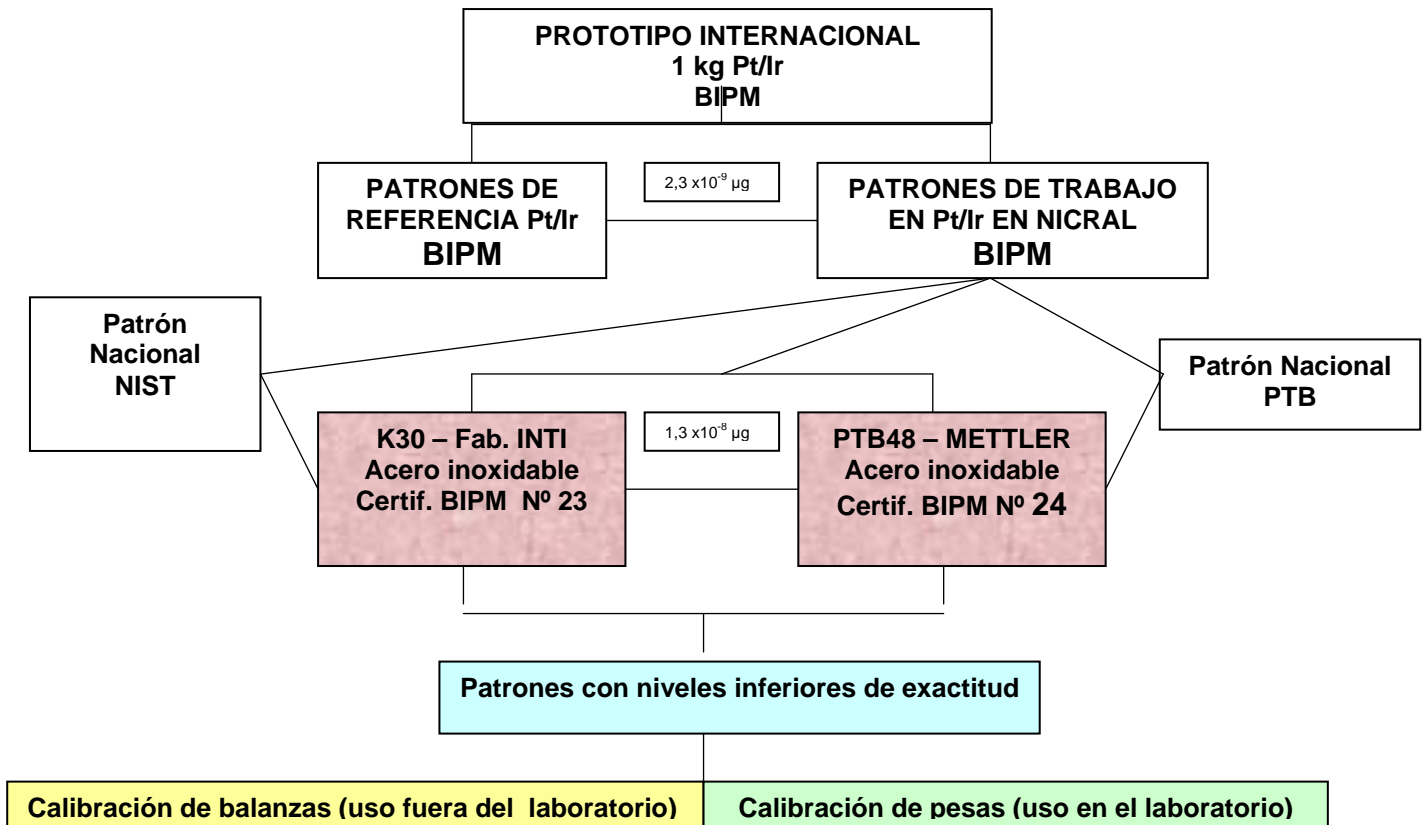


Figura 2: Cadena de Trazabilidad en Masa

En el ámbito académico, ciertamente no sería posible ni tampoco el objetivo final de que el estudiante de ingeniería mecánica deba conocer en detalle como se logra la disseminación de la escala. Pero también es cierto que no puede desconocer los pasos de esta cadena y los criterios básicos para establecer la relación de ella con la complejidad que conlleva a la hora de definir exactitudes e incertidumbres [6] en los sistemas de pesar.

### 2.3 Presión

Si bien esta magnitud no se encuentra entre las magnitudes de base, sino que es una unidad derivada del metro, el kilogramo y el tiempo ella se encuentra presente en diversas actividades fundamentalmente del ámbito industrial, seguridad y de la salud.

Aquí se da la misma situación que en la anterior donde el futuro ingeniero asocia generalmente la misma solamente los procesos de medición de presión relativa con manómetros.

En realidad es una de las mediciones más frecuentes en las industrias de procesos y es el instrumento más representativo en este tipo de mediciones.

Pero la exactitud de estos instrumentos no permite medir por ejemplo la altura de un avión comercial o militar, no permite establecer exactamente la tasa de fuga de un reactor nuclear, la presión atmosférica, las condiciones de salas limpias en procesos farmacéuticos, la exactitud en las transacciones de frontera para el gas natural, etc.

Muchas veces los ingenieros quedan atados a las especificaciones de los fabricantes de los instrumentos de medición donde ciertas condiciones de operación no son concretamente evaluadas.

Es necesario acceder a la formación metrológica para evaluar el comportamiento del instrumento a condiciones que se escapan de la de referencia. Es decir evaluar las condiciones más allá de las obtenidas en laboratorio donde la reproducibilidad cobra importancia. Cuáles son los efectos de la posición del instrumento, variaciones de temperatura del fluido a medir, condiciones ambientales, vibraciones, etc.

Hoy los laboratorios nacionales de metrologías y los laboratorios acreditados o supervisados, no solamente cuentan con patrones de las más altas exactitudes para las mediciones de presión, sino que además brindan el servicio de calibración de patrones muy similares en exactitud y en principio de funcionamiento.

Como vemos en el esquema antes de llegar a determinar la presión en un proceso donde necesitamos garantizar su trazabilidad es necesario pasar por una cadena vinculada al patrón primario del INTI de mediana y alta complejidad. [7]

En tal caso el futuro ingeniero debería poder relacionar las variables dadas en la ecuación de abajo, que representa la medición de presión a partir de las unidades primarias, con los niveles de incertidumbre requeridos.

$$P_r = \frac{\sum (m_i \cdot g \cdot (1 - \rho_a / \rho_m)) \cdot \cos \theta + \sigma \cdot c}{A_0 \cdot [1 + (\alpha + \beta) \cdot (t - 20^\circ) + \lambda \cdot p_{est}]} + (\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot \Delta h_c; \quad (2)$$

- |                    |   |                    |                            |
|--------------------|---|--------------------|----------------------------|
| $A_0$ :            | Area efectiva                                 | $d_a$ :            | Densidad del aire          |
| $l$ :              | Coefficiente de distorsión elástica           | $\Delta h_c$ :     | Corrección por altura      |
| $m_i$ :            | Masas   | $\sigma \cdot C$ : | tensión superficial        |
| $t$ :              | Temperatura del pistón-cilindro               | $\theta$ :         | verticalidad del sistema   |
| $\alpha + \beta$ : | Coefficiente de expansión térmica del sistema |                    | Sensibilidad de la balanza |
| $g$ :              | Gravedad local                                |                    | Estabilidad en el tiempo   |
| $dm$ :             | Densidad de las pesas                         |                    |                            |
| :                  |   |                    |                            |

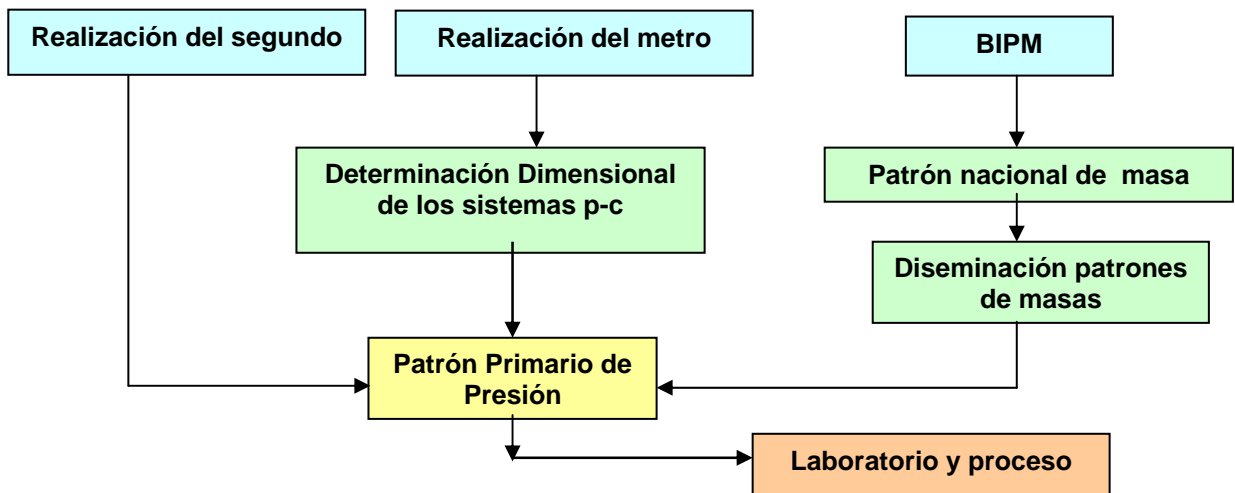


Figura 3: Cadena de Trazabilidad en Presión

## 2.4 Fuerza

Esta magnitud derivada de la unidad de masa y del tiempo, dentro de las unidades de mecánica lleva la parte de mayor estructura física debido a que su realización primaria debe ser efectuada con una máquina de carga directa (MCD) utilizando pesas en un campo gravitacional local.

Esto significa que si se debe establecer una fuerza de referencia de 10 kN se deberá por tal motivo suspender de una estructura establecida aproximadamente 1000 kg de masa. Para 100 kN aproximadamente 10 t de pesas y así sucesivamente a medida que incrementamos las cargas.

En la figura siguiente se puede observar esquemáticamente como está determinada la trazabilidad en esta magnitud.

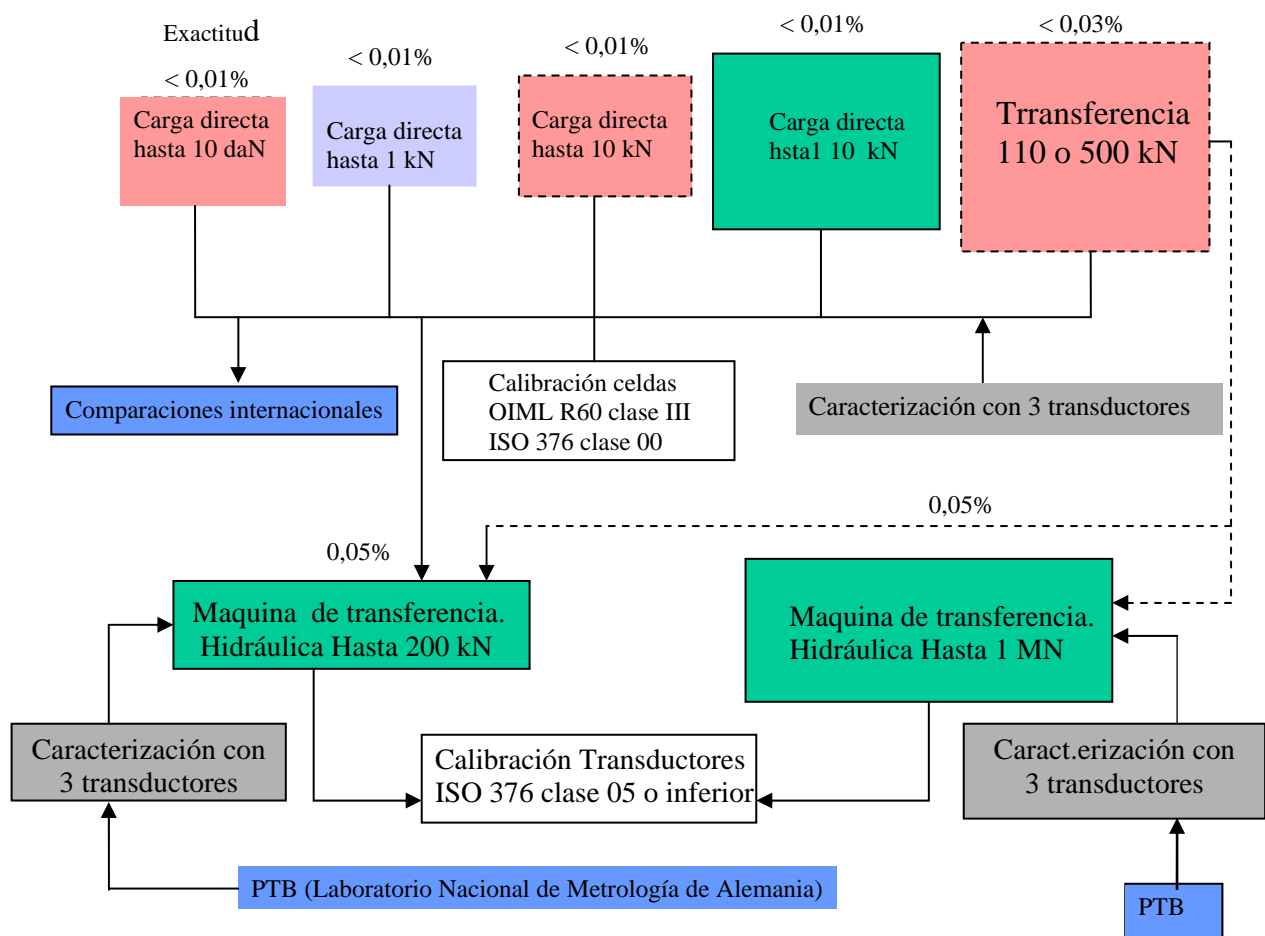


Figura 4: Cadena de Trazabilidad en Fuerza

## 2.5 Caudal en gas

El sistema de gasoductos en Argentina permite una capacidad diaria de transporte superior a los 120 millones de m<sup>3</sup> que se encuentra distribuida fundamentalmente en consumos industriales, domésticos, centrales térmicas de generación de electricidad y comercio internacional.

La extensión de esta red troncal es aproximadamente de 15 000 km, principalmente tendida en base a tres direcciones principales definidas geográficamente. Esta industria después de la privatización de la anterior compañía estatal Gas del Estado quedó configurada con 2 transportistas y 8 distribuidoras. Su operación se encuentra bajo la órbita del ente nacional de regulación (ENARGAS) a través de la Ley 24076 [8] y sus

Decretos Reglamentarios para distribución y transporte. No así el área de producción que no queda bajo esta modalidad. Es decir que la extracción de pozo del gas natural por parte de los productores es transportado hasta las destilerías donde se extraen los componentes pesados de este gas, inyectando posteriormente a los gasoductos troncales el gas con una alta composición de metano, que es luego entregado a las empresas distribuidoras para su distribución a los grandes y medianos clientes y a los consumos domiciliarios.

Con relación al comercio internacional se dispone de 10 puntos de entrega y 1 de recepción de frontera con los países de Brasil, Chile, Uruguay y Bolivia.

Ahora bien, todo este proceso requiere varias instancias de medición que pueden ser tecnológicamente más complejas una de otras pero, salvo las de balance interno, todas estas operaciones están afectadas a responsabilidades fiscales que pueden ser imputadas a impuestos internos, derechos provinciales o derechos de exportación.

Por tal motivo, el sistema presenta actores en juego que necesitan conocer la cantidad y la calidad del gas que se está comercializando fronteras adentro y afuera del país con un grado de exactitud acorde a la magnitud de las transacciones puestas en escena.

En la siguiente figura se muestran los actores en un proceso de comercialización, por ejemplo en la exportación del fluido:

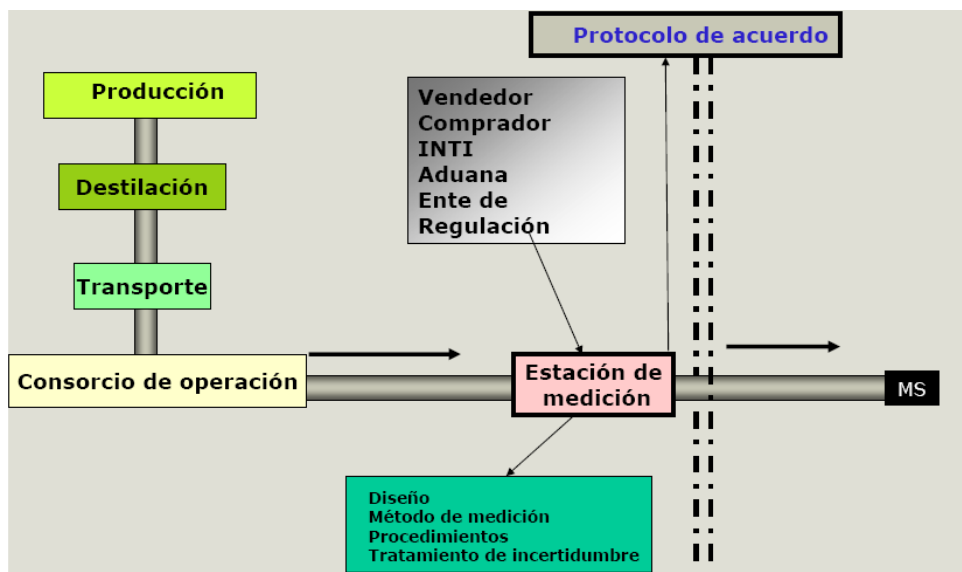


Figura 5: Actores en la comercialización por exportación

Si consideramos de este bloque el correspondiente a la estación de medición, encontraremos que la misma dispone de un sistema que no solamente determina el volumen de flujo desplazado sino también la corrección de todos los factores termodinámicos para llevar ese volumen a las condiciones de contrato, además del análisis de la calidad de gas. Si nos entramos más en el sistema de medición y tomamos un componente de este, por ejemplo el medidor propiamente dicho, observaremos la complejidad del subsistema para garantizar exactitudes de medición acordes a las reglamentaciones nacionales e internacionales. En la figura se observa la medición por el método de ultrasonido [9] e intervienen determinaciones de velocidad del flujo a partir de componer las velocidades parciales en la vena fluida bajo régimen turbulento.

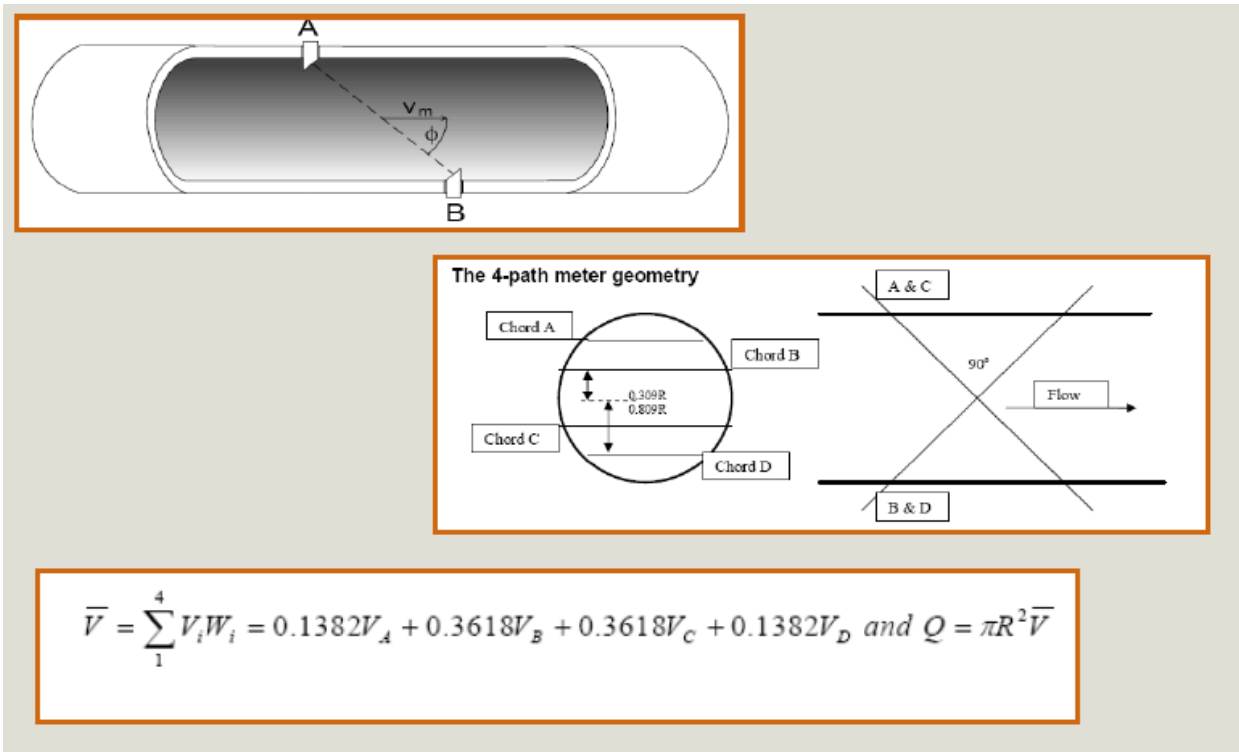


Figura 6: Medición ultrasónica en gas natural

Donde:

$V_i$ : velocidad del fluido en las secciones transversales de la tubería

$W_i$ : índice de ponderación de velocidad a partir del perfil de velocidad

### 3. CONCLUSIONES

Con referencia al impacto de la metrología aplicado en el ejemplo anterior de la medición de caudal de gas, cabe señalar que asumiendo: el consumo en la Argentina del orden de los 100 000 000 de  $m^3$  por día, el precio de comercialización del gas a gasoducto de US\$ 0,18  $m^3$ , un error de medición del 1% y considerando al menos tres etapas de medición antes del consumo en usinas, industrias, domiciliarios, etc., el cómputo del monto anual por mediciones sin la ingeniería adecuada, nos lleva a un valor de aproximadamente US\$ 200.000.000 al año, valor similar al costo de construcción de una autopista de 40 km de longitud por año.

No cabe así duda alguna sobre el rol del ingeniero en este campo. Su formación debe atender esta demanda tecnológica y económica a través de una sólida formación en Ingeniería de las Mediciones.

Este trabajo plantea la necesidad de desarrollar el espíritu metrológico de cada habitante y ello particularmente a través de la enseñanza básica. Los programas de estudio primario y secundario deben incorporar una formación relacionada con las magnitudes y sus mediciones. Sin embargo es en la formación de ingenieros donde esta cuestión toma aún más relevancia. En la República Argentina la organización curricular de las carreras de ingeniería responde a una estructura de bloques como la siguiente: Ciencias Básicas, Tecnologías Básicas, Tecnologías Aplicadas y espacios curriculares complementarios. La problemática metrológica solo es abordada a nivel general en algunas Ciencias Básicas y a nivel específico en algunas Tecnologías Aplicadas pero con énfasis en la metrología dimensional.

Si bien no excluyente de la formación del Ingeniero Mecánico, este por su directa participación en la operación de estos sistemas debe contar con las competencias señaladas en este trabajo y poder afrontar la metrología de otras magnitudes más allá de la tradicional y siempre vigente metrología dimensional.

#### 4. REFERENCIAS

- [1] CIPM report, *National and International Needs Relating to Metrology*, ("Blevin report", 1998)
- [2] CIPM report, *Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society, and the Role of the BIPM*, ("Kaarls report", 2007)
- [3] Terry Quinn, *The growing importance of the metrology*, 2003  
[www.bipm.org/utis/en/pdf/importance.pdf](http://www.bipm.org/utis/en/pdf/importance.pdf)
- [4] *The Metre Convention* [www.bipm.org/en/convention](http://www.bipm.org/en/convention)
- [5] Plan estratégico del INTI, 2008, [http://www.inti.gob.ar/pdf/plan\\_estrategico2008.pdf](http://www.inti.gob.ar/pdf/plan_estrategico2008.pdf)
- [6] *Guía para la Expresión de Incertidumbres de Medición* Traducción INTI (BIPM, IEC, I FCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993)
- [7] Sabuga W – Forastieri J, *Final report on comparison EURAMET.M.P-S6 of PTB and INTI pressure standards for the range 1.5 kPa to 300 kPa of absolute gas pressure*, Metrologia, 2008, 45, Tech. Suppl., 07020
- [8] *Ley del Marco Regulatorio del Ente Regulador del Gas en la Rep. Argentina* - 1992
- [9] American Gas Association, *Report Nro. 9, Measurement of gas by multipath Ultrasonic Meters*, 2007

#### Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a las autoridades del Departamento de Mecánica de la Facultad Regional Buenos Aires Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo brindado para llevar adelante este trabajo y al Departamento de Física y Metrología del Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI, por la asistencia técnica brindada sobre los aspectos metrológicos.